中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 12 期: 1919 ~ 1932
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
进 展 中华人民共和国成立70周年专题

南海中深层动力格局与演变机制研究进展

王东晓[1*], 王强[1†], 蔡树群[1], 尚晓东[1], 彭世球[1], 舒业强[1], 肖劲根[2], 谢晓辉[3], 张志伟[4], 刘志强[5], 兰健[4], 陈大可[3], 薛惠洁[1], 王桂华[6], 甘剑平[7], 解习农[8], 张锐[9], 陈慧[8], 杨庆轩[4]

1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;
2. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072;
3. 国家自然资源部第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012;
4. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266003;
5. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055;
6. 复旦大学大气科学研究院, 上海 200438;
7. 香港科技大学数学与环境科学系, 香港 999077;
8. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 武汉 430074;
9. 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361102

* E-mail: dxwang@scsio.ac.cn
† E-mail: wqiang@scsio.ac.cn

收稿日期: 2019-06-04; 收修改稿日期: 2019-11-05; 接受日期: 2019-11-11; 网络版发表日期: 2019-11-27
国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1405701)、中国科学院前沿科学重点研究计划项目(编号: QYZDJ-SSW-DQC022)、国家自然科学基金项目(批准号: 41521005、41730535、41776036、41676001、41776026)和国家重点研发计划全球变化及应对重点专项项目(编号: 2017YFA0603201)资助

摘要 南海是连接印度洋-太平洋的最大边缘海, 在季风、海峡水交换以及复杂地形影响下, 南海环流呈现出独特的三层结构以及远强于大洋的混合特征. 理论与观测表明, 南海内潮、内孤立波以及强风等过程是强混合的动力来源. 在南海强混合作用下, 南海发育了活跃的中深层动力系统, 一方面促进了南海与大洋之间的水体交换, 另一方面调控上层风生环流, 使得南海环流显著区别于其他热带与副热带海盆. 南海活跃的中深层环流所具有的物质搬运能力又显著影响着南海的地质沉积、生物地球化学循环等过程. 中国对深海研究持续投入, 在南海中深层环流动力学研究方面取得了显著的成果, 文章就该方面进行总结, 并对南海深海环流未来研究设想进行初步探讨.

关键词 南海中深层环流, 湍流混合, 多尺度相互作用, 深海环流环境效应

1 引言

近十年来大洋环流机械能学说的兴起(Ferrari和Wunsch, 2009), 使得海洋中小尺度动力过程如内波、混合等成为物理海洋学的热点研究方向之一. 内波破碎耗散被认为是驱动深海混合的主要能量来源, 而深

中文引用格式: 王东晓, 王强, 蔡树群, 尚晓东, 彭世球, 舒业强, 肖劲根, 谢晓辉, 张志伟, 刘志强, 兰健, 陈大可, 薛惠洁, 王桂华, 甘剑平, 解习农, 张锐, 陈慧, 杨庆轩. 2019. 南海中深层动力格局与演变机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 49: 1919–1932, doi: 10.1360/SSTe-2019-0122
英文引用格式: Wang D, Wang Q, Cai S, Shang X, Peng S, Shu Y, Xiao J, Xie X, Zhang Z, Liu Z, Lan J, Chen D, Xue H, Wang G, Gan J, Xie X, Zhang R, Chen H, Yang Q. 2019. Advances in research of the mid-deep South China Sea circulation. Science China Earth Sciences, 62: 1992–2004, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9546-3

© 2019 《中国科学》杂志社

海混合在维持大洋热盐环流的机械能平衡中起着决定性作用(Munk和Wunsch, 1998; Wunsch和Ferrari, 2004). 南海面积约为350×10^{4}km^2, 最大水深超过5500m, 是西太平洋最大的边缘海, 而季风和台风等大气强迫、黑潮入侵、涡旋、强潮和复杂地形等多因素的相互配置, 使得南海成为研究海洋中深层多尺度动力过程的天然试验场. 早期对南海温盐资料的分析发现, 南海深层密度廓线要比太平洋陡峭, 暗示了南海深层强混合的存在. 近年来的观测研究直接表明, 季风和台风触发的近惯性内波和天文潮与复杂地形作用产生的强内潮耗散, 使得南海中深层混合率比邻近大洋高两个数量级. 强混合导致南海中深层密度低于邻近大洋, 由此不仅驱动了吕宋海峡"深海瀑布"("overflow")的形成, 而且对南海中深层三维环流的维持也起着至关重要的作用.

南海孕育了季节性环流形态转变并具有多涡结构的上层系统(图1). 南海上层环流并非由风生机制单独控制, 而是一个风生、热盐、潮汐等多种动力过程耦合控制的环流系统. 在海峡水交换的驱动下, 南海环流呈现出显著的上(表层到750m)中(750~2400m)下(2400m以深)三层环流结构. 具体而言, 不仅太平洋水体能够通过巴士海峡的上层和下层进入并影响南海, 同时南海水体亦能够从巴士海峡中层返回太平洋. 南海深层位势密度大体呈现东北-西南走向的空间分布, 并且在菲律宾以西具有低盐中心, 在边界处存在由太平洋入侵的高盐度水体, 这种水团分布特征证实了深层气旋环流的存在. 溶解氧分析同样显示在深层存在低溶解氧中心, 并且在北部陆坡区域存在溶解氧露头, 这意味深层水体能够上涌到中上层, 并参与南海上层环流结构的演变.

南海具有显著强于大洋的深层混合特征, 并且在季风和吕宋海峡水交换的驱动下, 它具有独特的三维环流结构. 这种环流结构的特征、演变及其对海洋环境的影响是重要的科学问题, 也是目前南海区域海洋学研究的重点. 本文对近些年来关于南海中深层混合、环流及其环境效应方面的研究进展进行回顾与总结, 并讨论了未来的研究计划.

2 南海混合

为维持大洋经向翻转环流的观测强度, 全球海洋

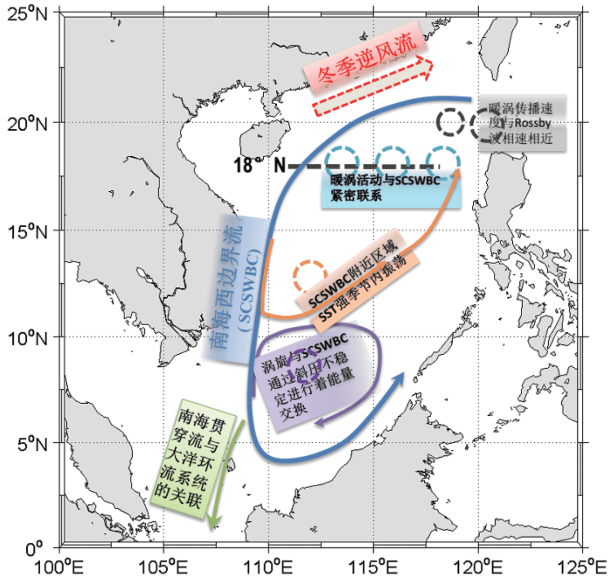

图 1　南海上层环流示意图

SCSWBC, 南海西边界流. 修改自Wang等(2013)

平均跨等密面混合的量级约为10^{-4}m^2 s^{-1}(Munk, 1966; Munk和Wunsch, 1998). 观测表明, 南海上层海洋混合从吕宋海峡向西南海盆方向减弱, 其量级由10^{-4}m^2 s^{-1}减弱到10^{-5}m^2 s^{-1}(Tian等, 2009; Zhang和Tian, 2014; Shang等, 2017a, 2017b). 在对南海上层海洋混合取得一定认知的基础上(卢著敏等, 2009; Zhang等, 2012; Liu和Lozovatsky, 2012; Yang等, 2014, 2017), 最近的一些观测研究表明南海深层混合能够达到10^{-3}m^2 s^{-1}的量级(Tian等, 2009; Yang等, 2016; Sun等, 2016; Sun和Wang, 2016), 比大洋背景场混合强度要高的多(图2). 南海深层强混合的原因主要归结于内潮、非线性内波、近惯性内波以及复杂地形等因素.

2.1 南海内潮与混合

绝大部分的正压潮转化为斜压潮, 而后斜压潮经过如非线性相互作用等过程发生破碎、耗散从而增强混合. 在不考虑斜压潮转化的情况下, 正压潮耗散率约为10^{-5}~10^{-3}W m^{-2}, 但在考虑斜压潮转化条件下, 耗散率增强到10^{-3}~10^{-1}W m^{-2}, 由此等效的南海中深层上涌速率能够达到上层风场Ekman抽吸的量级(10^{-6}m s^{-1})(Wang等, 2012).

内潮是在层结海洋中正压潮与地形相互作用而生成的(Wunsch, 1975). 在连接南海与太平洋的吕宋海峡

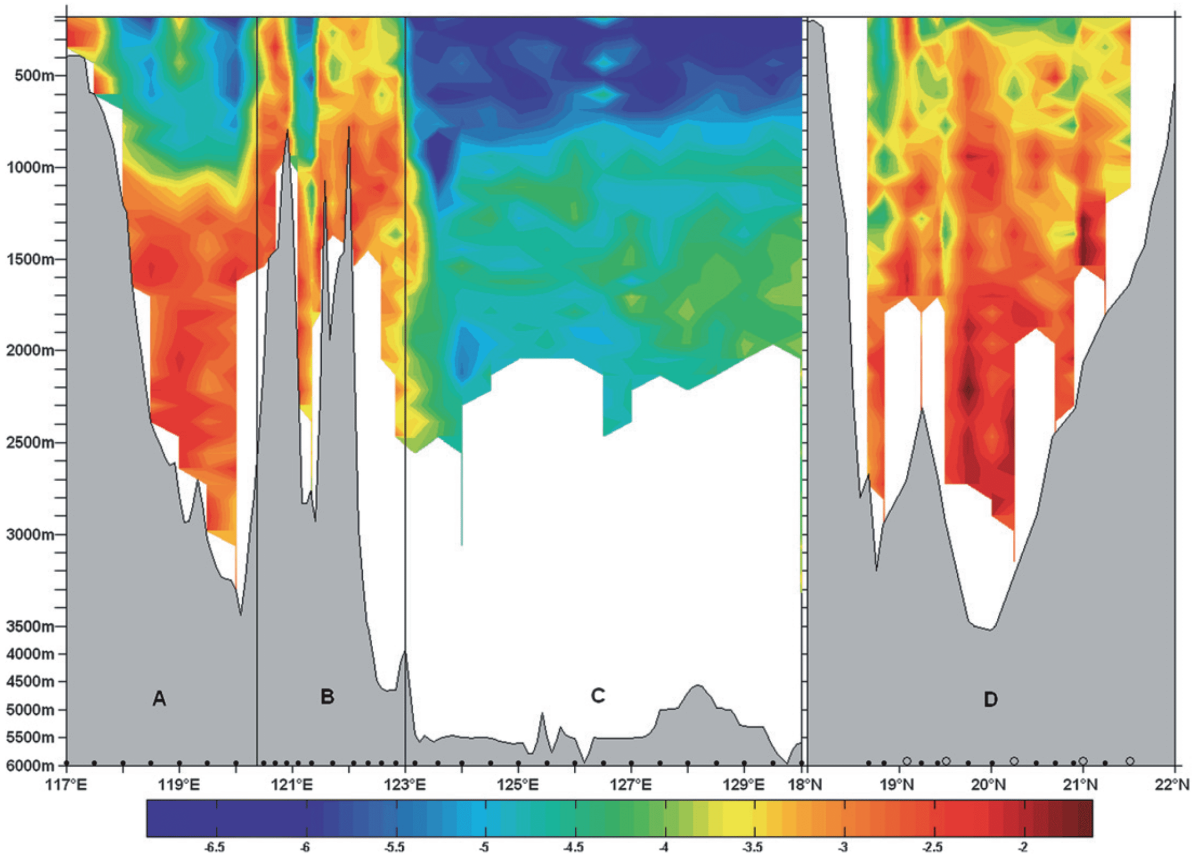

图 2　湍流混合($m^2\ s^{-1}$)的空间分布

数值已经进行了对数处理, 摘自Tian等(2009)

区域, 剧烈的底地形变化和强的正压潮运动激发了非常强的内潮, 使得该区域是南海内潮最主要的源区(Niwa和Hibiya, 2004; Jan等, 2007, 2008; Tian等, 2009; Zhao等, 2014; Alford等, 2015; Xu等, 2016). 除了吕宋海峡, 在东沙-中沙群岛以及南沙群岛等地形复杂区域, 强的内潮同样能够在局地生成(Jan等, 2007; Shang等, 2015a; Yang等, 2016).

当内潮在吕宋海峡产生后, 高模态内潮会在局地耗散, 而低模态内潮则能够携带大部分的能量向南海和西北太平洋传播(Tian等, 2003, 2009; Niwa和Hibiya, 2004; Chao等, 2007; Jan等, 2007; Zu等, 2008; Li等, 2011; Zhao等, 2014; Alford等, 2011, 2015; Wang等, 2016). 观测指出约有10GW内潮能量由吕宋海峡传入南海, 其中全日内潮约为4.6GW, 半日内潮约为5.4GW (Tian等, 2009). 对于半日内潮, 南海北部陆坡以亚临界地形为特征, 因而其能量很大一部分能够传播进入到北部陆架区域(Klymak等, 2011; Xie等, 2018); 对全日内潮而言, 南海北部陆坡是以临界-超临界地形为主要特征, 能量很难穿越陆坡的阻碍(Klymak等, 2011). 南海内潮的能量存在着季节变化(Wu等, 2013; Xu等, 2014; Shang等, 2015b), 因而由其引起的深层混合也存在着明显的季节变化(Sun等, 2016).

由吕宋海峡形成并传到南海的内潮及其他内波在很大程度上决定着南海混合的时空分布特征(卢著敏等, 2009; Shang等, 2015b, 2017a; Liang等, 2017). 强内潮在吕宋海峡产生后, 其中的高模态部分(具有短波长的内潮)会在局地直接耗散产生湍流, 由此激发的局地深层湍流混合强度要比临近的太平洋深层混合大好几个数量级(Alford等, 2015). 低模态部分传到南海后, 其耗散进而引发水体强混合的机制主要有非线性波-波相互作用(如参数化次调和不稳定)、海底粗糙地形的散射与反射以及转化成为更小尺度的内波等(Muller和Liu, 2000; Nash等, 2004; Klymak等, 2011; Xie等, 2008, 2011, 2013, 2018)(图3). 首先, 南海有着强的全日

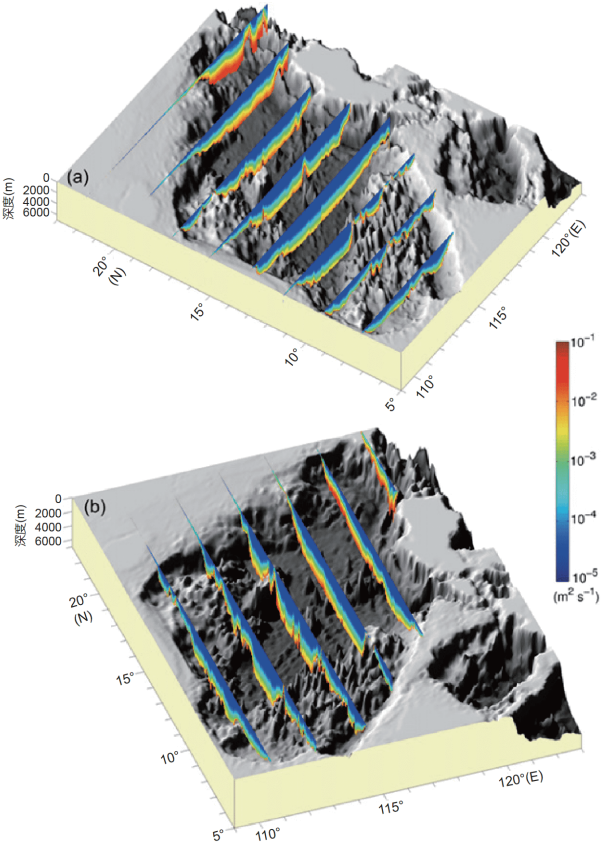

图 3　南海内潮引起的混合率的空间分布

(a) 纬向断面; (b) 经向断面. 修改自Wang等(2017)

内潮且穿越全日内潮亚谐波的临界纬度(~14°N), 该纬度可能是全日内潮参数化次调和不稳定最活跃的区域, 因而在该区域经常观测到由全日内潮不稳定激发的、可用于增强混合的小尺度内波(Xie等, 2009, 2016). 其次, 低模态全日内潮传播到南海北部大陆坡时, 由于临界地形的散射与反射而产生强的深水耗散与混合(Klymak等, 2011); 同时, 南海北部的锚系观测也表明半日内潮在亚临界地形区域能够通过海洋上层的反射增强非线性不稳定进而耗散能量引起湍流混合(Xie等, 2013). 另一方面, 西向传播的半日内潮能量也可通过非线性陡变产生大振幅的内孤立波, 这些大振幅内孤立波主要在浅陆坡与陆架区域耗散, 为这些区域的湍流混合提供能量(Zhao等, 2004; Buijsman等, 2010; Cai等, 2012; Alford等, 2015, Chen等, 2017).

如此强烈的混合一方面可以维持并加强南海与太平洋之间及海盆内部的水平密度梯度, 加速南海深层水的更新(Huang P等, 2016; Yang等, 2016), 另一方面也使得南海发育出成熟的经向翻转环流以及活跃的中深层流动(肖劲根等, 2013; Zhao等, 2014; Wang等, 2017; Zhao等, 2019). 同时, 南海水团的分布与南海混合强度从东北向西南逐渐降低的空间分布密切相关(Li和Qu, 2006; Qu等, 2009; Shang等, 2017a). 南海强烈的混合, 对南海不同水团存在显著的搅拌作用(Yang等, 2013, 2014), 从而诱发南海三层环流之间的相互作用, 使得南海不仅具有风生环流的特征, 同时也具有显著的热盐环流属性(Wang等, 2012). 数值实验表明, 南海强混合可以增强南海深层水平环流和垂向交换(Wang等, 2017). 深海环流的分布以及强度很大程度上被微尺度的湍流混合所控制, 并且由于混合驱动的深层水体上涌能够维持吕宋海峡水体交换, 从而维持了南海深海气旋式环流(Tian等, 2009). 在南海内区潮汐驱动的混合能够影响水团的分布以及变性从而影响南海环流格局的演变(Wang等, 2012).

2.2　南海内孤立波与混合

内孤立波是存在于海洋跃层中具有孤立子性质的强非线性大振幅波动, 并频繁出现于南海东北部海区. 内孤立波在传播过程中破碎诱发的强烈混合对南海水团分布以及环流有着重要贡献.

一般认为, 来自西太平洋的半日天文潮在跨越吕宋海峡水下陡峭的恒春、兰屿海脊进入南海时激发巨大的内潮, 并因背风波机制、波导射线机制、内潮释放机制、内潮非线性深化或内潮水跃向上游扰动机制等逐步演变成内孤立波(Zhao等, 2004; Buijsman等, 2010; Cai等, 2012; Chen等, 2017), 之后朝着东沙群岛方向传播, 其从源地到消亡的历程约三天(Alford等, 2015). 内孤立波在到达东沙群岛附近的陆架之前, 其能量基本全部耗散(Lien等, 2005; Chang等, 2006); 内孤立波在陆架浅水区发生由下凹型到上凸型的极性转换并伴随着显著的混合(Zhang等, 2018). 内孤立波通常以3种方式出现, 即单个孤立波、多个孤立波组成波包和多个波包组成波群. 其特征半倍波长从几百米至几千米, 周期从10~30min, 波包与波包之间的典型距离约为数10~100km, 其最大波致水平、垂直流速分别可达3.2和0.8m s^{-1}, 最大振幅可达260m(蔡树群, 2015; Huang X等, 2016). 南海夏季出现的内孤立波以第一斜压模态为主, 而冬季出现的内孤立波则以第二斜压模态为主(Yang等, 2009; Chen等, 2014).

内孤立波的破碎伴随着显著的混合，从而影响水团性质以及环流格局的演变(Zhang等, 2018); 同时, 当中尺度涡与内孤立波遭遇时会发生相互作用，对彼此的传播演变具有重要影响(Xie等, 2015; Huang等, 2017). 另一方面，内孤立波对南海北部热量和能量的输运起到重要的作用，进而显著影响中深层海洋环境(Lien等, 2005; Liang等, 2019).

2.3　南海近惯性内波与混合

近惯性内波是具有近惯性周期的内波. 季风以及频繁的热带气旋活动导致南海近惯性内波的盛行(Chu等, 2000; Sun等, 2011; Chen等, 2013; Cao等, 2018). 观测表明南海热带气旋尾迹中近惯性响应具有普遍性和显著性(Sun等, 2011; Cao等, 2018). 通过分析西沙群岛海域长时间潜标观测数据，Chen等(2013)揭示了反气旋涡通过增强垂向流速剪切和削弱层结，使得近惯性波在涡旋内部反射，导致近惯性内波能量长久维持且呈不同传播方向. Liu等(2018)基于9个台风过境南海西北部观测点的实测海流资料，研究表明台风过境后普遍诱发强的近惯性振荡，近惯性内波容易与局地占主导的全日或半日潮内波产生非线性相互作用而诱生fD_1波或fD_2波；由于背景涡旋或水体层结程度不同的影响，台风经过期间除了会导致近惯性内波出现红移(频率减小)或蓝移(频率增大)现象, 还会导致近惯性能量下传的差异. 南海近惯性内波也能够通过内潮的参量亚谐波不稳定(Xie等, 2009, 2011, 2016)以及中尺度涡与特定的小尺度粗糙地形相互作用产生(Sun等, 2016; Yang等, 2019).

理论与数值模式已经表明，表层产生的近惯性内波是可能向下传播到深海(Alford等, 2016). 南海有着丰富的近惯性内波，但它们的深海传播及其耗散仍然很少报道.

3　南海中深层中尺度过程

在复杂风场、地形以及海峡水交换的影响下，南海环流表现为多涡结构. 中尺度过程不仅是上层海洋动能的主要部分，也是中深层海洋环流的主要变率. 同时, 中尺度动力过程也对混合具有调控作用.

南海中深层环流具有活跃的季节内变化. 一方面, 源自上层强中尺度信号的诱导，例如强盛的中尺度涡垂向上沿伸数千米，导致中深层也存在中尺度环流结构；另一方面，源自深层自身产生的深海涡旋及波动结构；此外，西太平洋中深层的涡旋和季节内波动也可通过吕宋海峡传播进入南海. 基于2011年在南海北部的潜标资料，Zhang等(2013)发现南海北部中尺度涡能够从海表一直延伸到海底，即便在水深3000m的近海底其流速仍可超过5cm s^{-1}，从而对南海深海动力过程具有重要调控作用. 而2012年南海东北部潜标观测进一步表明，中尺度涡在近海底引起的强流能够对深层沉积物的搬运产生重要影响(Zhang等, 2014). 2013/2014年在南海北部开展的中尺度涡观测揭示了南海中尺度涡的全水深三维结构，指出南海中尺度涡是全水深的海洋现象，且由于地形beta效应的“牵引作用”，中尺度涡轴心随深度增加逐渐往西南方向倾斜(图4). 上述南海中尺度涡的三维倾斜结构及其对深层的影响，在水下滑翔机中尺度涡组网观测中得到进一步证实(Shu等, 2019). 由于中尺度涡结构的不对称性以及很深的扰动深度，并且其自身不断演变引起最外侧封闭流线同样也在变化，因而中尺度涡在经过南海北部陆坡后，能引发局地显著的净跨陆坡输运，从而对南海环流以及陆架环境具有重要作用(Wang等, 2018).

吕宋海峡中层流场也存在显著的10~30天和60天周期的季节内震荡，而这些季节内震荡可导致吕宋海峡中层高达6Sv的水体通量变化(该水体通量是利用19.8°N~21.2°N的潜标观测断面估算)，研究进一步指出这两类周期的季节内震荡分别由局地风场的季节内震荡和由太平洋西传至吕宋海峡的中尺度涡所导致(Zhang等, 2015).

南海中深层亦可产生活跃的深海涡旋及波动现象. 基于西沙潜标观测，在2012年4~5月发现一个具有强动能的深海涡旋, 半径约23~28km, 以(1.27±0.45)cm s^{-1}速度向西迁移，该涡旋引起的流速高达0.18m s^{-1}, 远高于平均流速0.03m s^{-1}，并且导致1200m深度处等温线下沉达120m，显著增强海洋中深层混合并使得海底沉积物出现成倍增长. 该涡旋不是由上层涡旋延伸到海底，而是上层环流流经海山，在海底激发产生(Chen等, 2015). 除了深海涡旋，观测发现南海深层存在周期为9~14天的持续存在、高能量的地形罗斯贝波，并具有和当地深层潮汐相当的能量(Shu等, 2016; Wang等, 2019)(图5). 位于南海中沙群岛东侧的潜标阵列观测表明，南海深层西边界流以季节内(~90天)变化

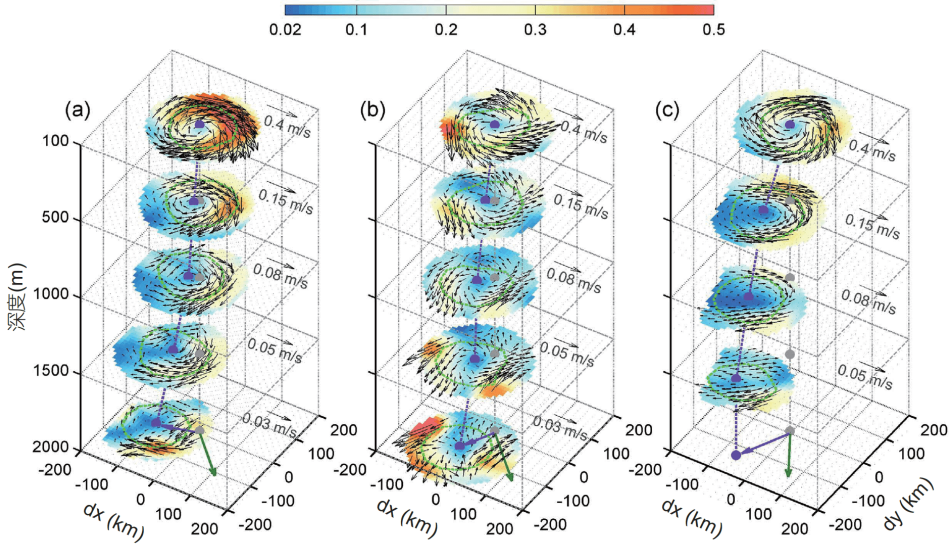

图 4　南海中尺度涡水平流速的全水深三维结构图

修改自Zhang等(2016)

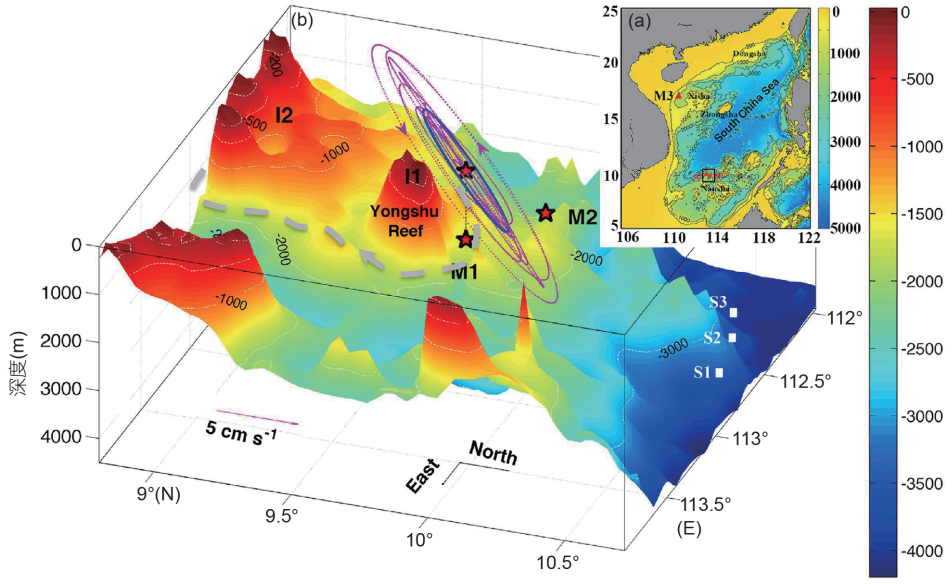

图 5　南海地形(a)和南海南部海域地形三维结构(b)

五角星: 潜标站点; 灰线: 地形Rossby波的可能传播路径; 红色散点: 流场轨迹; 蓝线: 方差椭圆. 修改自Shu等(2016)

为主, 并且这种变化特征具有西北向传播的特征, 传播速度为~2.9cm s^{-1}(Zhou等, 2017).

由于南海多尺度海洋动力过程活跃, 内潮产生与耗散也容易受到背景流场(如黑潮、中尺度涡等)的影响(Alford等, 2015; Huang等, 2018). 通过观测并结合数值模拟, Alford等(2015)指出吕宋海峡黑潮的入侵能够改变内波的振幅与传播方向, 进而影响内波的耗散与混合; Huang等(2018)通过分析一系列锚系观测指出南海中尺度涡等背景动力过程的变化对内潮的传播区域、演变过程和垂向模态具有显著的调制作用.

4　南海中深层三维环流

观测(Wang, 1986; Qu等, 2006; Wang等, 2011; Cheng等, 2015; Zhu等, 2017; Li等, 2018; 王晓慧等, 2018)以及模式研究(Yuan, 2002; Wang等, 2013; Gan等, 2016)均表明南海存在三层环流的现象, 表层和底层均为气旋式环流, 而在中层则为反气旋式环流. 观测表明, 这种环流结构与吕宋海峡"三明治"结构的水交换紧密相关(Tian等, 2006; Zhou等, 2014; Zhang等, 2015; 王东晓等, 2016). 理论模型(Yang和Price, 2007)、数值模拟(Lan等, 2013; Gan等, 2016)均指出了涡度收支在理解南海环流建立过程中的重要性(图6).

4.1　南海中深层水平环流

吕宋海峡"深海瀑布"是南海深层环流重要外部驱动. 西北太平洋深层水主要通过塔尔通峡谷(~0.4Sv)以及巴士海峡(0.83~1.2Sv)入侵南海, 然后进入吕宋海沟, 并从吕宋海沟西侧的两个豁口进入南海内区(0.88~2Sv)(Tian等, 2006; Zhao等, 2014; Ye等, 2019)(图7). 吕宋海峡以东的中深层环流以季节内变化为主导; 而在季节尺度上, 观测表明夏秋季节以南向为主, 冬春季节以北向为主, 方向的转换发生在4月初(Zhou等, 2018). 历史温盐资料的分析表明, 南海中深层水体在20世纪80年代要比20世纪60年代更淡(Liu等, 2012); Nan等(2013)分析结果进一步表明, 在20世纪90年代以及21世纪初, 南海中深层盐度表现出持续淡化特征.

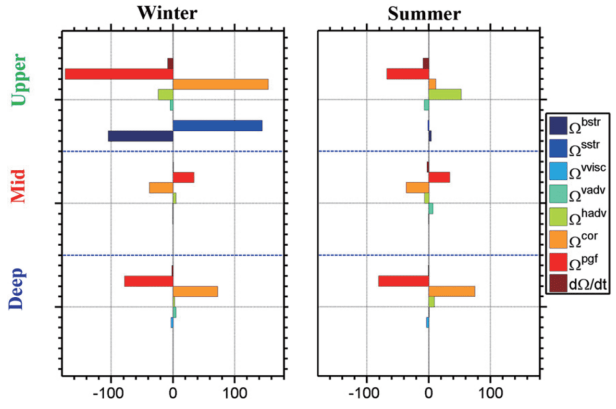

图 6　区域平均积分的涡度方程各项

左侧为冬季, 右侧为夏季. 上层为0~750m, 中层为750~1500m, 下层为1500到底. Ω^{cor}: 涡管项, Ω^{hadv}: 水平平流项; Ω^{vadv}: 垂向平流项, Ω^{pgf}: 压力旋度项, Ω^{sstr}: 风应力项; Ω^{bstr}: 底摩擦旋度, Ω^{vvisc}: 内摩擦旋度项, $d\Omega/dt$: 涡度倾向项. 摘自Gan等(2016)

观测温盐诊断结果均证实在南海北部陆坡中层水深500~1000m存在一支东北向的流, 推测其可能是南海中层反气旋式环流的北侧分支(Wang等, 2013). 并且这支流在经过东沙地形时, 在地形斜压联合作用下跨越等深线向内区流动. 吕宋海峡潜标阵列的长期观测结果表明, 虽然平均意义下吕宋海峡中层水交换是由南海进入太平洋, 但吕宋海峡中层的流场并非是简单的东向流, 而是存在"北进南出"的气旋式结构(Zhang等, 2015).

南海深层水团、位势涡度、溶解氧以及沉积物分析均表明南海深层存在气旋式环流结构(Li和Qu, 2006; Qu等, 2006), 2400m以深积分的地转流场直接给出了南海深层气旋式环流结构的分布, 并且表明南海深层西边界流(本文对深层西边界流的定义为2400m以深)的存在(Wang等, 2011), 上述特征在数值模拟结果中也得到了证实(Lan等, 2013). 随后, 南海深层西边界流被位于中沙群岛东侧的潜标阵列所证实, 并且发现深海西边界流流幅很窄, 其核心流速可以达到2cm s^{-1}, 以及具有1.65Sv的输运量(Zhou等, 2017)(图8).

南海中深层不同尺度运动之间存在显著的相互作用. 大尺度环流在经过海山后, 在其后侧引发激流并产生不稳定, 进而激发大尺度环流能量向中尺度涡能量的转化, 形成深海涡旋(Chen等, 2015). 而上层海洋涡

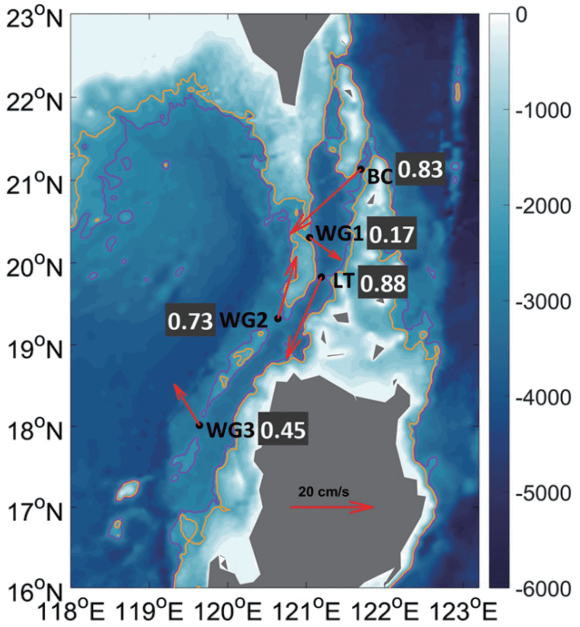

图 7　2200m以深的平均流速(红色箭头)以及海峡通量

图中数值表示海峡通量(Sv). 摘自Ye等(2019)

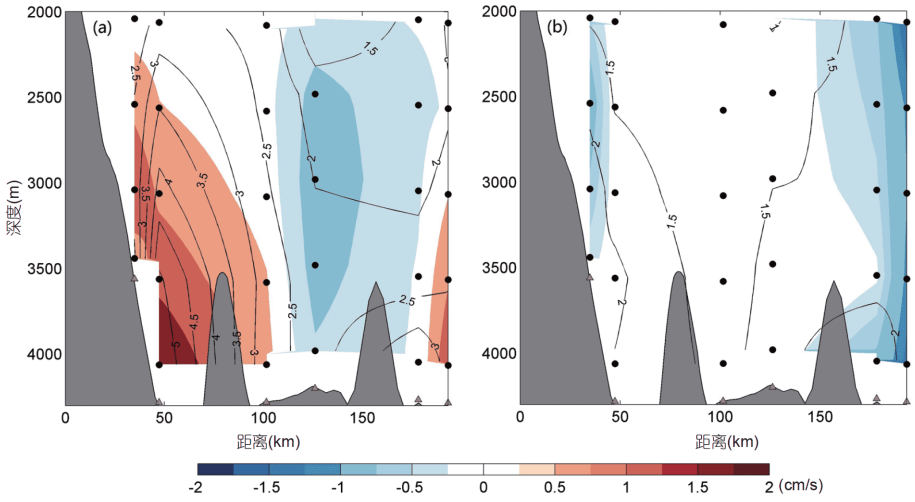

图 8　南海深层西边界流的经向(a)以及纬向(b)流速(沿15°N)

填充图是流速, 等值线为流速的标准差. 据Zhou等(2017)修改

旋在经过南海北部陡峭陆坡时，通过位势涡度守恒在海底引发的扰动能够被地形所捕获，进而激发更小时间尺度的地形波动(Shu等, 2016; Wang等, 2019). 在南海北部全水深潜标观测证实，次中尺度过程是南海中尺度涡旋耗散的主要机制(Zhang等, 2016). 模式结果证实，强混合能够驱动南海深层更强水平环流以及垂向运动，并且增强深层水体的上涌，影响上层环流的变化(Wang等, 2017).

模式研究指出，热盐环流引起的南海深层水涌升到上层对南海风生环流具有重要的调制作用(Wang等, 2012). 在夏天，深层水上涌能够减弱南海北部气旋式环流, 而加强南部反气旋式环流. 在冬天, 则是对整个海盆气旋式环流起到减弱作用.

4.2　南海翻转环流

垂向水体交换是南海热盐环流与风生环流相互作用的直接方式(Luyten和Stommel, 1986). 在吕宋海峡1500m以深, 西北太平洋水体入侵到南海, 由于南海具有强烈的混合使得南海水体密度比西北太平洋的水体密度要小, 并且由于海峡存在水深2200m海槛, 这使得入侵到南海的西北太平洋水体以“深海瀑布”的形式进入到南海深层，并且成为南海垂向水体交换的关键驱动因子之一(Qu等, 2006; Tian等, 2006). 在2200m以深, 南海成为完全封闭的海盆, 由吕宋海峡输入的水体必然要通过上涌的方式保持南海深层水体体积的守恒，模式、诊断以及观测研究估算吕宋“深海瀑布”的流量在0.7~2.5Sv(Wang, 1986; Qu等, 2006; Tian等, 2006; Chang等, 2010; Yang等, 2010, 2011; Zhou等, 2014; Ye等, 2019), 而依据该流量, 南海深层上涌速度则在10^{-6}m s^{-1}的量级，这个量级与上层Ekman抽吸引起的温跃层起伏速度的量级是一致的，这也蕴含了南海的热盐环流与风生环流同样的重要. 为了保持深层密度的稳定，要平衡吕宋“深海瀑布”入侵深层以及深层水体上涌到中层所带来的浮力通量，则需要南海深层跨等密面混合达到10^{-3}m^2 s^{-1}的量级.

目前对南海深层水体上涌到中层的具体方式有多种假设. 最为简单的是认为南海深层水均匀的上涌到中层(Qu等, 2006; Wang等, 2012), 这种假设在模式中易于设定，但是对于复杂地形下的南海显然是过于理想化的. 另一种则是基于数值模式结果提出的多胞结构，在南海南部、中部、北部分别存在一个上升带(Shu等, 2014), 这种带状分布的上升区与深海行星波动有关，但是从上涌强度的空间分布能够清晰看到上涌大值区域基本上位于地形陡峭的陆坡或者岛屿附近, 这其中隐含了第三种上涌方式, 即深海强流与陡峭地形作用诱发的强烈上涌. Wang等(2012)利用模拟的深海潮汐耗散估算上涌速率分布，发现上涌大值区基本上位于南海陡峭的陆坡区域以及西沙-中沙等复杂岛屿区域.

南海并非是单一的垂向交换方向，而是表现为三

层结构的经向翻转. 由于海峡水交换的存在, 南海具有不闭合的经向翻转流函数, 也就是净的垂向水体交换. 在上层500m是较强的顺时针的翻转, 西北太平洋次表层水入侵南海后在北部与南海水强烈的混合下沉, 在次表层向南输运并且被逐渐抬升, 在南海南部由于Ekman抽吸的作用导致水体上涌, 并且在表层返回北部; 南海深层, 是由“深海瀑布”驱动的强的顺时针翻转; 在上下两个经向翻转系统中间是较弱的逆时针的经向翻转(Wang等, 2004; 刘长建等, 2008; Fang等, 2009; Zhang等, 2014). 但是目前我们并不清楚翻转环流之间的垂向动力联系以及它们之间浮力通量的定量估算. 连接南海三层环流的经向翻转环流存在很强的近惯性振荡, 它的垂向模态基本为第一斜压模, 并且该信号向南传播, 传播速度为1~3m s^{-1}(Xiao等, 2016). 南海经向翻转的年代际变化具有南北相反的变化特征, 并且这种变化特征并不能单纯的用吕宋海峡水交换解析(Zhu等, 2016).

4.3 南海中深层环流的演变机制

南海经向翻转环流与南海上层气旋式环流、中层反气旋环流与深层气旋式环流互相配置, 构成了一个相当复杂的环流动力系统. 基于位势涡度积分约束(Yang和Price, 2000), Lan等(2013)阐明了南海深层气旋式环流特征是由吕宋海峡“深海瀑布”所决定的. “深海瀑布”将太平洋深层水体携带进入南海的同时, 也为南海深层水体带来了高位势涡度, 而只有西边界流所产生的侧摩擦才能将其耗散掉. 该机制通过数值试验得到证实. Lan等(2015)进一步揭示了南海深层环流季节变化的信号主要来源于吕宋海峡“深海瀑布”的季节变化, 而上层海洋的季节变化虽然强盛, 但是对深层海洋的作用有限. 模式结果表明吕宋海峡通量的上层入流-中层出流-深层入流与南海各层涡度收支平衡直接联系在一起, 成为南海大尺度环流尤其是中下层环流的主要涡度输入, 而地形斜压作用以及底摩擦则成为涡度的汇(Gan等, 2016).

5 南海中深层环流的环境效应

南海中深层环流深刻影响着南海的生物地球化学循环. 20世纪90年代, 韩舞鹰等(1998)便对南海深层海洋化学特征进行了描述. CO_2的沉降是研究全球碳循环的重要环节, 随着海水深度的增加, 温、盐、压力的变化改变了CO_2的平衡常数, 碳酸氢根所占比例随深度增加, 到800~1000m范围可达到90%以上. 基于示踪CFC-11的数据估算南海吸收人为CO_2的存量, 发现人为CO_2可输送到约1500m深处, 南海由于地处热带地区, 其翻转环流相对大洋和较高纬度海区要弱, 其人为CO_2存量相对其他区域海更少. 相对东海而言, 南海对北太平洋人为CO_2输入的贡献小一些(Huang P等, 2016). 另外, 深海微型生物对深层有机碳沉积有重要的贡献, 然而目前的海洋碳循环模型只考虑了深海的无机碳酸盐, 因此需要将其纳入南海碳循环的研究中(汪品先, 2009).

南海上层与中、深层环流的相互作用与水体交换, 影响着溶解氧的分布. 低溶解氧的西北太平洋北部中层水经巴士海峡进入南海, 造成了南海溶解氧最小值存在于南海中层水. 在逐渐南移的过程中, 随着有机物的氧化消耗, 氧含量逐渐降低, 南海中层水的氧最小值特征是海洋动力学条件和生物化学条件共同作用的结果(韩舞鹰等, 1998). 溶解氧分析同样证实在深层存在低溶解氧中心, 并且在北部陆坡区域存在溶解氧露头, 这意味深层水体能够上涌到中上层, 并参与南海三维环流结构的演变(Li和Qu, 2006).

由于生物死亡、代谢等的产物沉降后在深层水中氧化, 营养盐又被释放回海水中, 因此深层水往往富含营养盐. 涡旋的运动对深层营养盐和沉积物的分布产生影响. 研究发现海洋上层生成的中尺度涡挟裹着大量的陆源沉积物和营养盐, 将它们由陆架输运至深海. 台湾西南部海域中尺度涡数量丰富, 且生命周期长, 这些涡旋携带着源自台湾和其他区域的沉积物向西南方向输送, 并最终释放于深海海盆, 成为深层水沉积物输运的重要机制之一(Zhang等, 2014). 另一方面, 表层强流经过海山时尾流产生的深海涡旋, 增强了深层水的混合, 也对深海沉积物的再悬浮和输运产生影响(Chen等, 2015).

“等深流沉积”由Hollister和Heezen在20世纪60年代初首次提出并用以描述美国东部大陆边缘在西边界潜流影响下形成的深海波痕(Heezen和Hollister, 1964). 南海底层等深流是南海深层侧边界流, 属于南海深层环流的一部分. 模式结果以及理论分析均表明, 吕宋“深海瀑布”是南海深层气旋式等深流的关键驱动因子之一, 当“深海瀑布”关闭后, 等深流则变为反气旋式流

动; 而南海地形坡度, 内波破碎与深层混合能够加强气旋式等深流(肖劲根等, 2013; Xie等, 2018). Xie等(2018)在南海北部大陆坡区观测到内潮耗散能够在底层产生等深流, 最大流速超过0.15m s^{-1}. 根据反射地震资料推测了由巴士海峡入侵南海的水体的前进路线, 即沿南海北部陆坡向西北而后进入南海内区, 并且在前进过程中会有上涌现象, 并且在上涌过程中会产生再悬浮, 从而形成东沙沉积体(Lüdmann等, 2005; 邵磊等, 2007; Zheng和Yan, 2012). 等深流与浊流的增强与南海西北部海域沉积体系的变迁发育有着很强的联系(Zhu等, 2010; Xu等, 2013; Chen等, 2013, 2016).

6 展望

目前关于南海中深层环流的研究已经取得了一些进展, 但是仍有一些问题尚未解决.

(1) 目前对南海深层内潮混合已取得一定的进展, 但由于南海内孤立波为典型的潮成内孤立波, 其触发的深海混合目前尚无深入研究. 季风或台风触发的下传近惯性内波以及底部地转流由于不稳定触发的上传近惯性内波对南海深层混合的贡献也不清楚. 此外, 吕宋海峡季节内扰动、强流与复杂地形(由其是西沙-中沙-黄岩岛之间的岛链)、中上层海洋的扰动等在深海季节内扰动中各自具有怎样的作用, 需要更高分辨率模式以及新的观测手段的帮助. 而深海涡旋由于其高能量和强混合, 对于海底光揽、海底石油管道、深海探测、深海沉积物以及深海的生态有着非常大的影响. 由于目前观测技术的限制, 以及深海涡旋自身的变异特征和在上层海洋无印迹的特点, 对于深海涡旋的观测非常少, 且极难被发现; 深海涡旋的影响亦少有揭示, 亟待进一步研究. 单点观测不足以全面描述中小尺度过程, 潜标阵列需要的经济投入非常巨大, 目前较为合适的一种选择是深水Glider-潜标-CPIES的联合组网观测.

(2) 南海深层环流的驱动机制及三层环流之间的相互作用. 目前认为南海深层环流是吕宋海峡"深海瀑布"驱动的气旋式环流, 但在南海深层强混合的背景环境下, 该机制能够解析多少深层环流是不清楚的. 混合与深层环流之间的动力联系也同样是不清楚. 因此, 南海深层环流的形成机制还是要继续探索, 除了大尺度的动力约束关系, 还需要考虑潮汐混合、地形、垂直水体交换、表面大气压等要素在其中的作用. 南海三层环流不是独立的, 而是相互联系在一起. 但是目前并不知道三层环流之间的动量、涡度、热量、盐度是以什么途径在什么尺度上交换的, 而这种物质能量的交换对各自的维持以及变异有怎么样的作用. 期望对这方面的研究有所突破, 而单点的观测已是无法满足, 全水深的潜标阵列以及CPIES的联合组网观测是今后有效的手段之一.

(3) 南海深层环流的环境效应探究. 南海深层等深流的流速相对于颗粒卷起所需要的速率来讲是不足够的, 那么深层环流对沉积环境搬迁有怎样的贡献需要深入的研究, 更是需要详细分析各种尺度海底异常急流的贡献.

参考文献

蔡树群等, 著. 2015. 内孤立波数值模式及其在南海区域的应用. 北京: 海洋出版社

韩舞鹰等, 著. 1998. 南海海洋化学. 北京: 科学出版社

刘长建, 杜岩, 张庆荣, 王东晓. 2008. 南海次表层和中层水团年平均和季节变化特征. 海洋与湖沼, 39: 55–64

卢著敏, 陈桂英, 尚晓东. 2009. 南海北部中深层细结构混合研究. 热带海洋学报, 28: 21–28

邵磊, 李学杰, 耿建华, 庞雄, 雷永昌, 乔培军, 王嘹亮, 王宏斌. 2007. 南海北部深水底流沉积作用. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 771–777

汪品先. 2009. 南海-我国深海研究的突破口. 热带海洋学报, 28: 1–4

王东晓, 肖劲根, 舒业强, 谢强, 陈举, 王强. 2016. 南海深层环流与经向翻转环流的研究进展. 中国科学: 地球科学, 46: 1317–1323

王晓慧, 张卫民, 王品强, 杨俊, 王辉赞. 2018. 基于Argo历史观测的南海海盆尺度中层流场研究. 海洋学报, 6: 4–17

肖劲根, 谢强, 刘长建, 陈举, 王东晓, 陈美榕. 2013. 一个考虑潮汐, 中尺度涡和地形影响的南海底部环流诊断模型. 海洋学报, 35: 1–13

Alford M H, Peacock T, MacKinnon J A, Nash J D, Buijsman M C, Centurioni L R, Centuroni L R, Chao S Y, Chang M H, Farmer D M, Fringer O B, Fu K H, Gallacher P C, Graber H C, Helfrich K R, Jachec S M, Jackson C R, Klymak J M, Ko D S, Jan S, Johnston T M S, Legg S, Lee I H, Lien R C, Mercier M J, Moum J N, Musgrave R, Park J H, Pickering A I, Pinkel R, Rainville L, Ramp S R, Rudnick D L, Sarkar S, Scotti A, Simmons H L, St Laurent L C, Venayagamoorthy S K, Wang Y H, Wang J, Yang Y J, Paluszkiewicz T, Tang T Y D. 2015. The formation and fate of internal waves in the South China Sea. Nature, 521: 65–69

Alford M H, MacKinnon J A, Simmons H L, Nash J D. 2016. Near-

inertial internal gravity waves in the ocean. Annu Rev Mar Sci, 8: 95–123

Buijsman M C, Kanarska Y, McWilliams J C. 2010. On the generation and evolution of nonlinear internal waves in the South China Sea. J Geophys Res-Oceans, 115: C02012

Cai S Q, Xie J S, He H Y. 2012. An overview of internal solitary waves in the South China Sea. Surv Geophys, 33: 927–943

Cai S Q, Xie J S, Xu J X, Wang D, Chen Z W, Deng X D, Long X M. 2014. Monthly variation of some parameters about internal solitary waves in the South China sea. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 84: 73–85

Cao A, Guo Z, Song J, Lv X, He H, Fan W. 2018. Near-Inertial waves and their underlying mechanisms based on the South China Sea internal wave experiment (2010–2011). J Geophys Res-Oceans, 123: 5026–5040

Chao S Y, Ko D S, Lien R C, Shaw P T. 2007. Assessing the west ridge of Luzon Strait as an internal wave mediator. J Oceanogr, 63: 897–911

Chang M H, Lien R C, Tang T Y, D'Asaro E A, Yang Y J. 2006. Energy flux of nonlinear internal waves in northern South China Sea. Geophys Res Lett, 33: L03607

Chang Y T, Hsu W L, Tai J H, Tang T Y, Chang M H, Chao S Y. 2010. Cold deep water in the South China Sea. J Oceanogr, 66: 183–190

Chen H, Xie X, Zhang W, Shu Y, Wang D, Vandorpe T, Van Rooij D. 2016. Deep-water sedimentary systems and their relationship with bottom currents at the intersection of Xisha Trough and Northwest Sub-Basin, South China Sea. Mar Geol, 378: 101–113

Chen G, Wang D, Dong C, Zu T, Xue H, Shu Y, Chu X, Qi Y, Chen H. 2015. Observed deep energetic eddies by seamount wake. Sci Rep, 5: 17416

Chen Z W, Xie J S, Xu J X, Zhan J M, Cai S Q. 2013. Energetics of nonlinear internal waves generated by tidal flow over topography. Ocean Model, 68: 1–8

Chen Z W, Nie Y H, Xie J S, Xu J X, He Y H, Cai S Q. 2017. Generation of internal solitary waves over a large sill: From Knight Inlet to Luzon Strait. J Geophys Res-Oceans, 122: 1555–1573

Chen Z W, Xie J, Wang D, Zhan J M, Xu J, Cai S. 2014. Density stratification influences on generation of different modes internal solitary waves. J Geophys Res-Oceans, 119: 7029–7046

Cheng L, Zhang Z W, Zhao W, Tian J W. 2015. Temporal variability of the current in the northeastern South China Sea revealed by 2.5-year-long moored observations. J Oceanogr, 71: 361–372

Chu P C, Veneziano J M, Fan C W, Fan C. 2000. Response of the South China Sea to tropical cyclone Ernie. J Geophys Res, 105: 13991–14009

Fang G, Wang Y, Wei Z, Fang Y, Qiao F, Hu X. 2009. Interocean circulation and heat and freshwater budgets of the South China Sea based on a numerical model. Dyn Atmos Oceans, 47: 55–72

Ferrari R, Wunsch C. 2009. Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks. Annu Rev Fluid Mech, 41: 253–282

Gan J P, Liu Z Q, Hui R X. 2016. A three-layer alternating spinning circulation in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 46: 2309–2315

Heezen B C, Hollister C. 1964. Deep-sea current evidence from abyssal sediments. Mar Geol, 1: 141–174

Huang P, Zhang M, Cai M, Ke H W, Deng H X, Li W Q. 2016. Ventilation time and anthropogenic CO_2 in the South China Sea based on CFC-11 measurements. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 116: 187–199

Huang X, Chen Z, Zhao W, Zhang Z, Zhou C, Yang Q, Tian J. 2016. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea. Sci Rep, 6: 30041

Huang X, Wang Z, Zhang Z, Yang Y, Zhou C, Yang Q, Zhao W, Tian J. 2018. Role of mesoscale eddies in modulating the semidiurnal internal tide: Observation results in the northern South China Sea. J Phys Oceanogr, 48: 1749–1770

Huang X, Zhang Z, Zhang X, Qian H, Zhao W, Tian J. 2017. Impacts of a mesoscale eddy pair on internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by mooring array observations. J Phys Oceanogr, 47: 1539–1554

Jan S, Chern C S, Wang J, Chao S Y. 2007. Generation of diurnal K_1 internal tide in the Luzon Strait and its influence on surface tide in the South China Sea. J Geophys Res-Oceans, 112: C06019

Jan S, Lien R C, Ting C H. 2008. Numerical study of baroclinic tides in Luzon Strait. J Oceanogr, 64: 789–802

Klymak J M, Alford M H, Pinkel R, Lien R C, Yang Y J, Tang T Y. 2011. The breaking and scattering of the internal tide on a continental slope. J Phys Oceanogr, 41: 926–945

Lan J, Zhang N, Wang Y. 2013. On the dynamics of the South China Sea deep circulation. J Geophys Res-Oceans, 118: 1206–1210

Lan J, Wang Y, Cui F, Zhang N. 2015. Seasonal variation in the South China Sea deep circulation. J Geophys Res-Oceans, 120: 1682–1690

Li L, Qu T. 2006. Thermohaline circulation in the deep South China Sea basin inferred from oxygen distributions. J Geophys Res-Oceans, 111: C05017

Li H, Song D, Chen X, Qian H, Mu L, Song J. 2011. Numerical study of M2 internal tide generation and propagation in the Luzon Strait. Acta Oceanol Sin, 30: 23–32

Li L, Guo X G, Wu R S. 2018. The winter western boundary current of the South China Sea: Physical structure and volume transport in December 1998. Acta Oceanol Sin, 37: 1–7

Liang C R, Chen G Y, Shang X D. 2017. Observations of the turbulent kinetic energy dissipation rate in the upper central South China Sea.

Ocean Dyn, 67: 597–609

Liang C R, Shang X D, Chen G Y. 2019. The vertical heat transport of internal solitary waves over the continental slope in the northern South China Sea. Acta Oceanol Sin, 38: 36–44

Liu Z Y, Lozovatsky I. 2012. Upper pycnocline turbulence in the northern South China Sea. Chin Sci Bull, 57: 2302–2306

Liu J L, He Y H, Li J, Cai S Q, Wang D, Huang Y D. 2018. Cases study of nonlinear interaction between near-inertial waves induced by typhoon and diurnal tides near the Xisha Islands. J Geophys Res-Oceans, 123: 2768–2784

Lien R C, Tang T Y, Chang M H, D'Asaro E A. 2005. Energy of nonlinear internal waves in the South China Sea. Geophys Res Lett, 32: L05615

Liu C J, Wang D, Chen J, Du Y, Xie Q. 2012. Freshening of the intermediate water of the South China Sea between the 1960s and the 1980s. Chin J Ocean Limnol, 30: 1010–1015

Luyten J R, Stommel H. 1986. Gyres driven by combined wind and buoyancy flux. J Phys Oceanogr, 16: 1551–1560

Lüdmann T, Wong H K, Berglar K. 2005. Upward flow of North Pacific Deep Water in the northern South China Sea as deduced from the occurrence of drift sediments. Geophys Res Lett, 32: L05614

Müller P, Liu X. 2000. Scattering of internal waves at finite topography in two dimensions. Part I: Theory and case studies. J Phys Oceanogr, 30: 532–549

Munk W H. 1966. Abyssal recipes. In: Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. Elsevier. 13: 707–730

Munk W, Wunsch C. 1998. Abyssal recipes II: Energetics of tidal and wind mixing. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 45: 1977–2010

Nan F, Xue H, Chai F, Wang D, Yu F, Shi M, Guo P, Xiu P. 2013. Weakening of the Kuroshio intrusion into the South China Sea over the past two decades. J Clim, 26: 8097–8110

Nash J D, Kunze E, Toole J M, Schmitt R W. 2004. Internal tide reflection and turbulent mixing on the continental slope. J Phys Oceanogr, 34: 1117–1134

Niwa Y, Hibiya T. 2004. Three-dimensional numerical simulation of M_2 internal tides in the East China Sea. J Geophys Res-Oceans, 109: C04027

Qu T, Girton J B, Whitehead J A. 2006. Deepwater overflow through Luzon Strait. J Geophys Res-Oceans, 111: C01002

Qu T, Song Y T, Yamagata T. 2009. An introduction to the South China Sea throughflow: Its dynamics, variability, and application for climate. Dyn Atmos Oceans, 47: 3–14

Shang X D, Liu Q, Xie X H, Chen G Y, Chen R Y. 2015b. Characteristics and seasonal variability of internal tides in the southern South China Sea. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 98: 43–52

Shang X D, Liang C R, Chen G Y. 2017a. Spatial distribution of turbulent mixing in the upper ocean of the South China Sea. Ocean Sci, 13: 503–519

Shang X D, Qi Y F, Chen G Y, Liang C R, Lueck R G, Prairie B, Li H. 2017b. An expendable microstructure profiler for deep ocean measurements. J Atmos Ocean Technol, 34: 153–165

Shang X D, Qi Y F, Chen G Y, Liang C R. 2015a. Observations of upper layer turbulent mixing in the southern South China Sea. Acta Oceanol Sin, 34: 6–13

Shu Y Q, Xue H J, Wang D, Chai F, Xie Q, Cai S Q, Chen R Y, Chen J, Li J, He Y K. 2016. Persistent and energetic bottom-trapped topographic Rossby waves observed in the southern South China Sea. Sci Rep, 6: 24338

Shu Y, Xue H, Wang D, Chai F, Xie Q, Yao J L, Xiao J G. 2014. Meridional overturning circulation in the South China Sea envisioned from the high-resolution global reanalysis data GLBa0.08. J Geophys Res-Oceans, 119: 3012–3028

Shu Y, Chen J, Li S, Wang Q, Yu J, Wang D. 2019. Field-observation for an anticyclonic mesoscale eddy consisted of twelve gliders and sixty-two expendable probes in the northern South China Sea during summer 2017. Sci China Earth Sci, 62: 451–458

Sun Z, Hu J, Zheng Q, Li C Y. 2011. Strong near-inertial oscillations in geostrophic shear in the northern South China Sea. J Oceanogr, 67: 377

Sun H, Yang Q, Zhao W, Liang X, Tian J. 2016. Temporal variability of diapycnal mixing in the northern South China Sea. J Geophys Res-Oceans, 121: 8840–8848

Sun H, Wang Q. 2016. Microstructure observations in the upper layer of the South China Sea. J Oceanogr, 72: 777–786

Tian J, Zhou L, Zhang X, Liang X, Zheng Q, Zhao W. 2003. Estimates of M_2 internal tide energy fluxes along the margin of Northwestern Pacific using TOPEX/POSEIDON altimeter data. Geophys Res Lett, 30

Tian J, Yang Q, Liang X, Xie L, Hu D, Wang F, Qu T. 2006. Observation of Luzon Strait transport. Geophys Res Lett, 33: L19607

Tian J W, Yang Q X, Zhao W. 2009. Enhanced diapycnal mixing in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 39: 3191–3203

Wang D, Wang Q, Zhou W, Cai S, Li L, Hong B. 2013. An analysis of the current deflection around Dongsha Islands in the northern South China Sea. J Geophys Res-Oceans, 118: 490–501

Wang D, Liu X, Wang W, Du Y, Zhou W. 2004. Simulation of meridional overturning in the upper layer of the South China Sea with an idealized bottom topography. Chin Sci Bull, 49: 740–746

Wang G H, Huang R X, Su J L, Chen D K. 2012. The effects of

thermohaline circulation on wind-driven circulation in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 42: 2283–2296

Wang G G, Xie S P, Qu T, Huang R X. 2011. Deep South China Sea circulation. Geophys Res Lett, 38: L05601

Wang J. 1986. Observation of abyssal flows in the Northern South China Sea. Acta Oceanogr Taiwan, 16: 36–45

Wang Q, Zeng L, Li J, Chen J, He Y, Yao J, Wang D, Zhou W. 2018. Observed cross-shelf flow induced by mesoscale eddies in the northern South China Sea. J Phys Oceanogr, 48: 1609–1628

Wang Q, Zeng L, Shu Y, Li J, Chen J, He Y, Yao J, Wang D, Zhou W. 2019. Energetic topographic Rossby Waves in the northern South China Sea. J Phys Oceanogr, 49: 2697–2714

Wang X, Liu Z, Peng S. 2017. Impact of tidal mixing on water mass transformation and circulation in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 47: 419–432

Wang X W, Peng S, Liu Z, Huang R X, Qian Y K, Li Y. 2016. Tidal mixing in the South China Sea: An estimate based on the internal tide energetics. J Phys Oceanogr, 46: 107–124

Wu L D, Miao C B, Zhao W. 2013. Patterns of K1 and M2 internal tides and their seasonal variations in the northern South China Sea. J Oceanogr, 69: 481–494

Wunsch C. 1975. Internal tides in the ocean. Rev Geophys, 13: 167–182

Wunsch C, Ferrari R. 2004. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans. Annu Rev Fluid Mech, 36: 281–314

Xiao J, Xie Q, Wang D, Yang L, Shu Y, Liu C, Chen J, Yao J, Chen G. 2016. On the near-inertial variations of meridional overturning circulation in the South China Sea. Ocean Sci, 12: 335–344

Xie X H, Chen G Y, Shang X D, Fang W D. 2008. Evolution of the semidiurnal (M_2) internal tide on the continental slope of the northern South China Sea. Geophys Res Lett, 35: L13604

Xie X H, Shang X D, van Haren H, Chen G Y, Zhang Y Z. 2011. Observations of parametric subharmonic instability-induced near-inertial waves equatorward of the critical diurnal latitude. Geophys Res Lett, 38: L05603

Xie X H, Liu Q, Zhao Z X, Shang X D, Cai S Q, Wang D, Chen D. 2018. Deep sea currents driven by breaking internal tides on the continental slope. Geophys Res Lett, 27: 6160–6166

Xie X, Liu Q, Shang X, Chen G, Wang D. 2016. Poleward propagation of parametric subharmonic instability-induced inertial waves. J Geophys Res-Oceans, 121: 1881–1895

Xie X H, Shang X D, van Haren H, Chen G Y. 2013. Observations of enhanced nonlinear instability in the surface reflection of internal tides. Geophys Res Lett, 40: 1580–1586

Xie X H, Shang X D, Chen G Y, Sun L. 2009. Variations of diurnal and inertial spectral peaks near the bi-diurnal critical latitude. Geophys Res Lett, 36: L02606

Xie J S, He Y H, Chen Z W, Xu J X, Cai S Q. 2015. Simulations of internal solitary wave interactions with mesoscale eddies in the northeastern South China Sea. J Phys Oceanogr, 45: 2959–2978

Xu J P, Barry J P, Paull C K. 2013. Small-scale turbidity currents in a big submarine canyon. Geology, 41: 143–146

Xu Z H, Yin B S, Hou Y J, Liu A K. 2014. Seasonal variability and north-south asymmetry of internal tides in the deep basin west of the Luzon Strait. J Mar Syst, 134: 101–112

Xu Z, Liu K, Yin B, Zhao Z, Wang Y, Li Q. 2016. Long-range propagation and associated variability of internal tides in the South China Sea. J Geophys Res-Oceans, 121: 8268–8286, doi: 10.1002/2016JC012105

Yang J Y, Price J F. 2007. Potential vorticity constraint on the flow between two basins. J Phys Oceanogr, 37: 2251–2266

Yang Y J, Fang YC, Chang MH, Ramp S R, Kao C C, Tang T Y. 2009. Observations of second baroclinic mode internal solitary waves on the continental slope of the northern South China Sea. J Geophys Res, 114: C10003, doi: 10.1029/2009JC005318

Yang Q, Tian J, Zhao W, Xie L. 2013. Turbulent dissipation and mixing in Prydz Bay. Chin J Oceanol Limnol, 31: 445–453

Yang Q, Zhao W, Liang X, Tian J W. 2016. Three-dimensional distribution of turbulent mixing in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 46: 769–788

Yang J, Price J F. 2000. Water-mass formation and potential vorticity balance in an abyssal ocean circulation. J Mar Res, 58: 789–808

Yang Q, Tian J, Zhao W. 2010. Observation of Luzon Strait transport in summer 2007. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 57: 670–676

Yang Q, Tian J, Zhao W. 2011. Observation of material fluxes through the Luzon Strait. Chin J Ocean Limnol, 29: 26–32

Yang Q, Nikurashin M, Sasaki H, Sun H, Tian J W. 2019. Dissipation of mesoscale eddies and its contribution to mixing in the northern South China Sea. Sci Rep, 9: 556

Yang Q, Tian J, Zhao W, Liang X F, Zhou L. 2014. Observations of turbulence on the shelf and slope of northern South China Sea. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 87: 43–52

Yang Q, Zhao W, Liang X, Dong J H, Tian J W. 2017. Elevated mixing in the periphery of mesoscale eddies in the South China Sea. J Phys Oceanogr, 47: 895–907

Ye R, Zhou C, Zhao W, Tian J W, Yang Q X, Huang X D, Zhang Z W, Zhao X L. 2019. Variability in the deep overflow through the Heng-Chun Ridge of the Luzon Strait. J Phys Oceanogr, 49: 811–825

Yuan D L. 2002. A numerical study of the South China Sea deep circulation and its relation to the Luzon Strait transport. Acta Oceanol Sin, 21: 187–202

Zhang Y, Liu Z, Zhao Y, Wang W G, Li J R, Xu J P. 2014. Mesoscale eddies transport deep-sea sediments. Sci Rep, 4: 5937

Zhang Z, Zhao W, Tian J, Liang X. 2013. A mesoscale eddy pair southwest of Taiwan and its influence on deep circulation. J Geophys Res-Oceans, 118: 6479–6494

Zhang Z, Zhao W, Tian J, Yang Q X, Qu T D. 2015. Spatial structure and temporal variability of the zonal flow in the luzon strait. J Geophys Res-Oceans, 120: 759–776

Zhang Z, Tian J, Qiu B, Zhao W, Chang P, Wu D, Wan X Q. 2016. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the south china sea. Sci Rep, 6: 24349

Zhang X, Huang X, Zhang Z, Zhou C, Tian J, Zhao W. 2018. Polarity variations of internal solitary waves over the continental shelf of the northern South China Sea: Impacts of seasonal stratification, mesoscale eddies, and internal tides. J Phys Oceanogr, 48: 1349–1365

Zhang S, Xie L, Cao R, Zhao H. 2012. Observation of upper-ocean mixing in the region west of the Luzon Strait in spring. J Coast Res, 28: 1208–1213

Zhang Y W, Tian J W. 2014. Enhanced turbulent mixing induced by strong wind on the South China Sea shelf. Ocean Dyn, 64: 781–796

Zhao W, Zhou C, Tian J, Yang Q X, Wang B, Xie L L, Qu T D. 2014. Deep water circulation in the Luzon Strait. J Geophys Res-Oceans, 119: 790–804

Zhao Z, Klemas V, Zheng Q, Yan X. 2004. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea. Geophys Res Lett 31: L06302

Zhao X, Zhou C, Xu X, Ye R, Tian J, Zhao W. 2019. Deep Circulation in the South China Sea simulated in a regional model. Ocean Sci Discuss, doi: 10.5194/os-2019-29

Zheng H B, Yan P. 2012. Deep-water bottom current research in the northern South China Sea. Mar Georesour Geotech, 30: 122–129

Zhou C, Zhao W, Tian J, Yang Q, Qu T. 2014. Variability of the deep-water overflow in the Luzon Strait. J Phys Oceanogr, 44: 2972–2986

Zhou C, Zhao W, Tian J, Zhao X L, Zhu Y C, Yang Q X, Qu T D. 2017. Deep western boundary current in the south China sea. Sci Rep, 7: 9303

Zhou C, Zhao W, Tian J, Yang Q X, Huang X D, Zhang Z W, Qu T D. 2018. Observations of deep current at the western boundary of the Northern Philippine Basin. Sci Rep, 8: 14334

Zhu M, Graham S, Pang X, McHargue T. 2010. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: Implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea. Mar Pet Geol, 27: 307–319

Zhu Y, Sun J, Wang Y, Wei Z, Yang D, Qu T. 2017. Effect of potential vorticity flux on the circulation in the South China Sea. J Geophys Res-Oceans, 122: 6454–6469

Zhu Y, Fang G, Wei Z, Wang Y, Teng F, Qu T. 2016. Seasonal variability of the meridional overturning circulation in the South China Sea and its connection with inter-ocean transport based on SODA2.2.4. J Geophys Res-Oceans, 121: 3090–3105

Zu T, Gan J, Erofeeva S Y. 2008. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea. Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap, 55: 137–154

(责任编委: 焦念志)